

論文

GFRP-コンクリート合成床版の静的載荷試験

瀬下棕太*, 大西弘志**, 古川陽大*

*岩手大学大学院、総合科学研究院地域創生専攻（〒020-8551 岩手県盛岡市上田4丁目3-5）

** 博士(工), 岩手大学教授, 理工学部システム創成工学科（〒020-8551 岩手県盛岡市上田4丁目3-5）

道路橋床版における腐食損傷の対策として耐食性の高いGFRPを用いた道路橋床版が開発されている。海外では床版支間を小さくすることでGFRPのみで構成された板材を活用している事例があるが、国内ではGFRPとコンクリートを組み合わせた合成床版形式が採用されている。これらに対し、断面の自由度を確保する方策として既存の形材を接着接合により構成した板材とコンクリート舗装を合成した形式の床版を考え、押抜きせん断試験を実施した。

キーワード: GFRP, GFRP-コンクリート合成床版, 接着接合

1. はじめに

近年、わが国では橋梁をはじめとする社会基盤構造物の老朽化に伴う維持管理が課題となっている。老朽化の目安とされる建設後50年を経過した橋梁は2023年度には約37%であるのに対し、10年後には約61%になるとされている¹⁾。老朽化が進む橋梁において様々な劣化損傷が確認されているが、その中でも塩害によるコンクリート構造物中の鉄筋の腐食に伴う断面欠損とその周辺のコンクリートの破損・剥離は深刻な損傷である。

コンクリート構造物の塩害に伴う鉄筋腐食やコンクリートの損傷を回避するため、鋼材の代替物としてFRPを用いることが考えられている。

国内でFRPを道路橋の床版に適用した事例としてFRP合成床版²⁾が挙げられる。FRP合成床版はFRP材を永久型枠として用い、コンクリート硬化後は強度部材の一部として作用させる合成床版である。これ以外の研究ではGFRPグレーチング構造の床版モデルに静的載荷試験が実施されたが、T荷重の片側相当(100kN)の荷重載荷時に大きなたわみが発生しており、実際の橋梁への適用には至っていない^{3), 4)}。また、あらかじめ成形されたGFRP形材を接着接合することで床版の断面を構築する構造モデルでは梁モデルでのみ載荷実験が行われ、床版モデルでの実験は実施していない⁴⁾。以上のことから、本研究では既往の研究の対象とされている、GFRP形材組立構造を有する2種類の床版モデルに対して断面剛性の確保と局所変形の抑制を目的として床版上面にコンクリート層を導入することとし、押し抜きせん断試験を実施した。

表-1 GFRP形材の成形方法と繊維含有率

形材名	成形方法	繊維含有率
グレーチング	ハンドレイアップ法	25%~30%
積層板	プレス成型法	60%~70%
パイプ	引抜成形法	65%~68%

表-2 コンクリートの物性値

試験体名	圧縮強度(MPa)	弾性係数(GPa)
1-1	62.3	30.9
1-2	69.8	31.4
2-1	60.7	30.1
2-2	56.6	30.1

表-3 各材料の物性値

使用材料	引張強度(MPa)	曲げ強度(MPa)	弾性係数(GPa)	ボアソン比
グレーチング	27.7	-	5.51	0.14
積層板(t=3)	304.8	-	24.1	0.15
積層板(t=4)	259.1	-	24.1	0.14
パイプ	-	1102	14.9	-

表-4 接着材引張付着強度試験結果
(GFRP-コンクリート, 平均値)

試験体	最大引張荷重(N)	最大引張付着応力(MPa)
2-1	2820	1.65
2-2	2717	1.67

2. 試験体概要

2.1 使用材料詳細

表-1に各GFRP形材の成形方法と纖維含有率を示す。また、試験体上面に配置したコンクリート版には施工を簡易にするために無収縮グラウトコンクリート（プレミックスタイル）（太平洋マテリアル：太平洋プレユーロックスGC）を使用した。GFRP形材の接着やGFRP板材とコンクリート版の接着にはエポキシ系接着剤（セメダイン：セメダイン1500）を使用した。また、表-2、表-3、表-4に各材料の材料試験の結果を示す。

2.2 試験体詳細

図-1、図-2、にGFRPグレーチングをFRP構造として採用した試験体（以下、試験体1）の平面図と試験体端部の側面図、図-3、図-4にGFRPパイプと板材を形材に採用した試験体（以下、試験体2）の平面図と試験体中心部の側面図を示す。

試験体1はGFRPグレーチングの上部にコンクリート層をエポキシ系接着剤により接合した試験体を2体（試験体1-1、1-2）とコンクリート層の効果を確認するための比較用としてのGFRPのみの試験体（試験体1-3）を用意した。GFRPグレーチングの寸法は2087mm×967mm、厚さ40mmである。GFRPグレーチングは既存の形材を使用したため、板厚は上下で異なり、上部が7mm、下部が5mmとなっている。開口部は、部材の厚さ方向の中心部位置において80mm×80mmである。コンクリート層として700mm×1000mm、厚さ20mmのコンクリート版をGFRPグレーチングの長辺方向に3枚設置している。また、載荷中にコンクリート版が異なる挙動を示すことを防ぐためにコンクリート版の側面同士もエポキシ系接着剤で接合している。

試験体2は2枚のGFRP積層板（2020mm×1010mm、t=3mm or 4mm）の間に外径34mm、内径28mmのGFRPパイプをエポキシ系接着剤で接合した構造をFRP部に有している。GFRP積層板の板厚は床版内に発生する曲げ応力の違いを考慮して、試験体の上側を3mm、下側を4mmとした。試験体1と同様にコンクリート層として700mm×1000mm、厚さ20mmのコンクリート版を上側のGFRP積層板の上面にエポキシ系接着剤を用いて接合している。コンクリート層とGFRP部をエポキシ系接着剤で接合した試験体を2体（試験体2-1、2-2）とGFRP部のみの試験体（試験体2-3）を用意した。また、コンクリート版同士の側面をエポキシ系接着剤で接合している。

3. 試験概要

試験体の支持条件を図-5に示す。今回の試験では支持条件として4辺を単純支持している。特に試験体1において、GFRPグレーチングが支圧破壊等の早期変状することを避けるため、支点の位置とGFRPグレーチングの格子部材の位置を揃えるように設定した。長辺支持辺の間隔を800mm、短辺支持辺の間隔を1760mmとしている。荷重載荷位置は床版の中央であり、荷重載荷範囲は

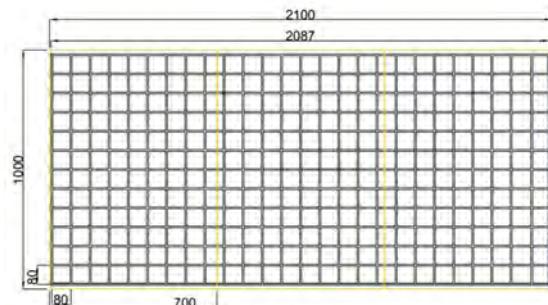


図-1 試験体1平面図



図-2 試験体1側面図（試験体端部詳細）

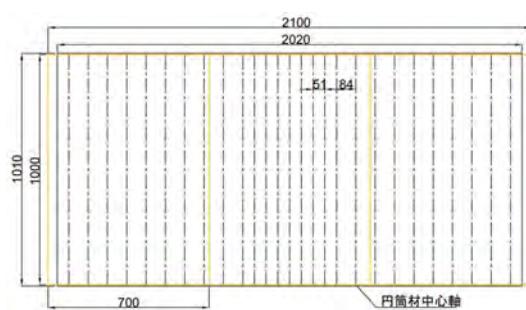


図-3 試験体2平面図

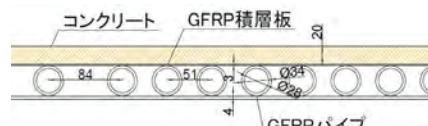


図-4 試験体2側面図（試験体中心部詳細）



図-5 載荷試験時支持条件

トラックタイヤの接地面積を参考に200mm×200mmとした。また、試験体の浮き上がりを防ぐことを目的に、試験体の四隅に万力を配置した。載荷プログラムを図-6に示す。載荷方法は載荷と除荷を繰り返す繰り返し漸増載荷とし、荷重を1ステップあたり10kNずつ増加させ、試験体1では3ステップまで、試験体2では4ステップ

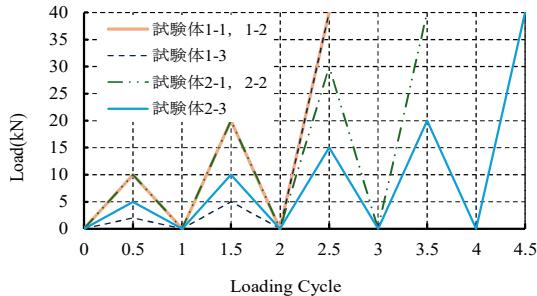


図-6 各試験体の載荷ステップ

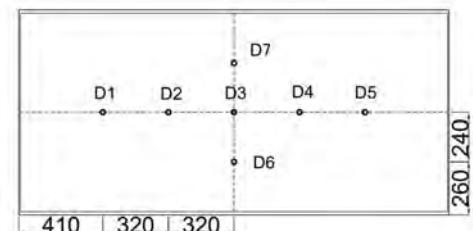
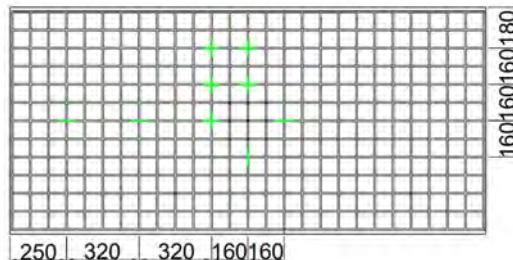
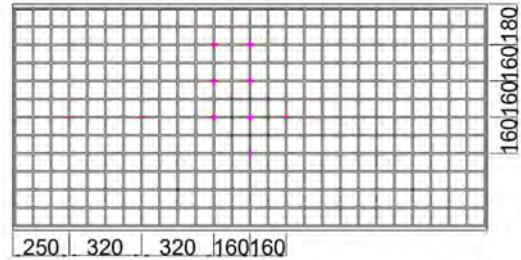


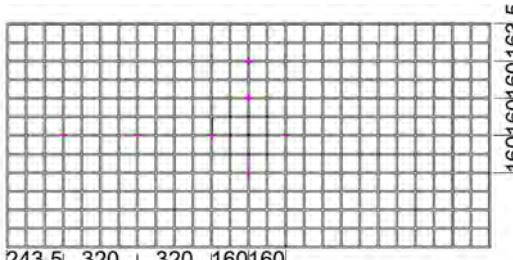
図-7 変位測定位置 (D1-D7)



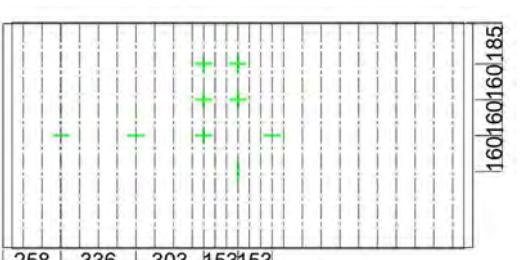
(a) 試験体 1-1, 1-2 (上面)



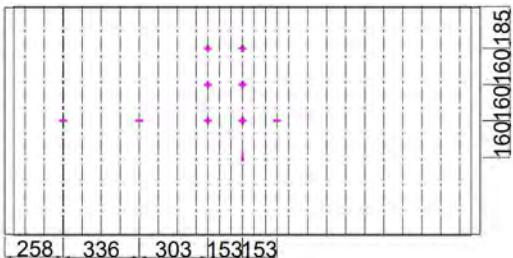
(b) 試験体 1 (下面)



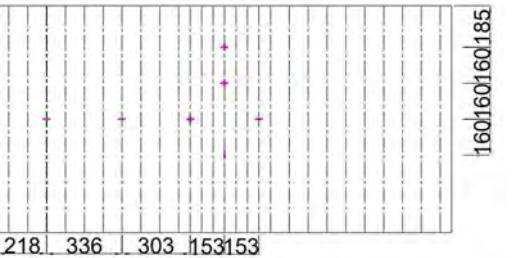
(c) 試験体 1-3 (上面)



(d) 試験体 2-1, 2-2 (上面)



(e) 試験体 2 (下面)



(f) 試験体 2-3 (上面)

図-8 各試験体のひずみ測定位置

目まで載荷した。最終ステップでは試験体が破壊に至るまで荷重を載荷している。上面にコンクリートを設置していない試験体 1-3、試験体 2-3 は剛性が小さいことから過大な変形が生じることが予測されたので、小さな荷重で載荷ステップを構成した。試験体 1-3 では 1 ステップ目で 2kN、2 ステップ目で 5kN まで載荷し、3 ステップ目以降試験体が破壊に至るまで載荷を実施した。また、試験体 2-3 では荷重を 5kN ずつ増加させ 5 ステップ目以降試験体が破壊に至るまで載荷している。図-7 に変位測

定位置、図-8 に各試験体のひずみ測定位置を示す。ひずみは、試験体の対称性を利用し、試験体の 1/4 の範囲で集中して測定している。

4. 試験結果

4.1 破壊状況

載荷試験終了時の試験体 1 の破壊状況を図-9、図-10 に示す。試験体 1-1 は載荷試験の早期からコンクリー



図-9 試験体 1-1 破壊状況



図-10 試験体 1-3 破壊状況



図-11 試験体 2-1 載荷点破壊状況



図-12 試験体 2-3 破壊状況

ト版と GFRP グレーチングの接合部の破壊による剥離音が生じていたことから、接着強度が不足していた可能性が高い。これはコンクリート版と GFRP グレーチング間で接着面積が十分ではなかったことを示していると推測される。また、中心のコンクリート版のみが大きく変形し、コンクリート版同士の接着接合部が破壊したことが分かる（図-9）。コンクリート版同士の接合において接着強度が不足していたためコンクリート版間に連続体として挙動できなかったとみられる。載荷点では、押し抜きせん断破壊が発生した（図-9）。試験体 1-3 では載荷に伴う過大な変形が見られた。（図-10）。また、試験終了時には GFRP グレーチングに水平方向のひび割れが確認できた。これは GFRP グレーチング内部に発生したせん断応力の影響であると考えられる。載荷試験終了時の試験体 2 の破壊状況を図-11、図-12 に示す。試験体 2 は試験体 1 と比較すると比較的大きな荷重が作用するまで接着接合の破壊に伴う剥離音は確認できなかったが、接着強度の限界を超過すると接着接合部からの破壊に伴う剥離音の発生と変位の増大が進行し、最終的にはコンクリート版の押し抜きせん断破壊によって試験は終了した。試験体 2-3 は載荷試験の早期から接合部の破壊に起因する剥離音が生じたが過大な変形は確認できなかった。試験体 2-3 では、載荷点下部の積層板とパイプの接合の破壊が確認されたため、試験を終了した（図-12）。

4.2 荷重一変位曲線

各試験体中央における荷重一変位曲線を図-13 に示す。試験体 1-1, 1-2 は載荷試験初期に比較的高い剛性を示したが、試験体 1-1 では載荷荷重が 17kN、試験体 1-2 では 25kN に達した付近で荷重が大きく低下したことが確認できる。このことから載荷試験時において試験体 1-1, 1-2 は早期にコンクリートと GFRP グレーチングの接合部で破壊と分離が起きていることが推測される。また、試験体中央の変位が 30mm から 60mm の範囲において、試

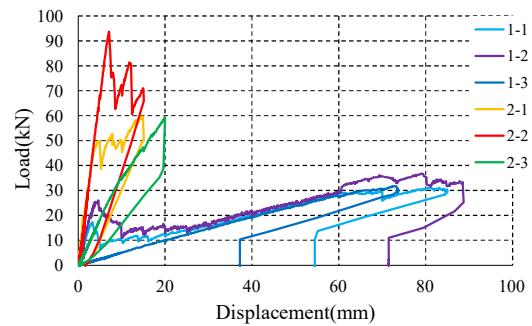


図-13 荷重一変位曲線

験体 1-1, 1-2 は、コンクリート層を配置していない試験体 1-3 の荷重一変位曲線とほぼ一致していることから、この時点で GFRP グレーチングとコンクリート層の接合部の破壊により、合成構造として機能できていないことが考えられる。試験体 2-1, 試験体 2-2 は載荷開始時に高い剛性を示したが、試験体 2-1 は 45kN、試験体 2-2 は 93kN 付近で荷重が低下しているが、荷重が低下した後も、試験体 2-3 の荷重一変位曲線に接近するものの、同一の挙動を示すには至っていない。このことから GFRP 部とコンクリート間で剥離が生じたが部分的な剥離のみで、コンクリートと GFRP が完全に分離したわけではないと判断できる。

さらに、試験体破壊時の変位を見ると試験体 1-1, 1-2 はどちらも L/10（約 80mm, L : 主桁間隔）程度であり実際の橋梁に適用するには変形が過大であることが分かった。試験体 2 は試験体 1 と比較して小さな変形にとどまっているが、T 荷重 100kN (200mm × 500mm) に相当する 40kN (200mm × 200mm) 載荷時点では、L/270（約 3mm）程度の変形が生じていた。これは道路橋示方書のたわみ制限値⁹⁾と比較すると、制限範囲外の値を示している結果となった。

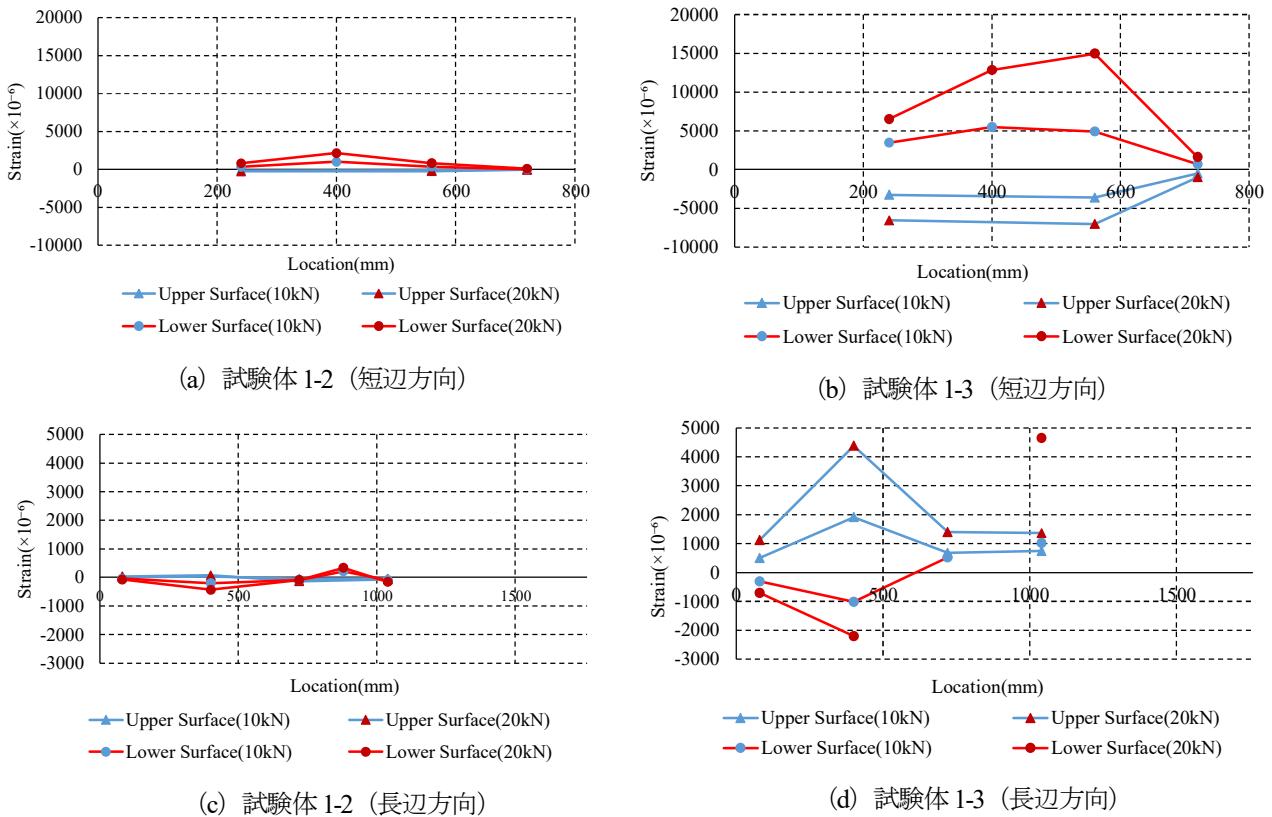


図-14 試験体 1 ひずみ分布

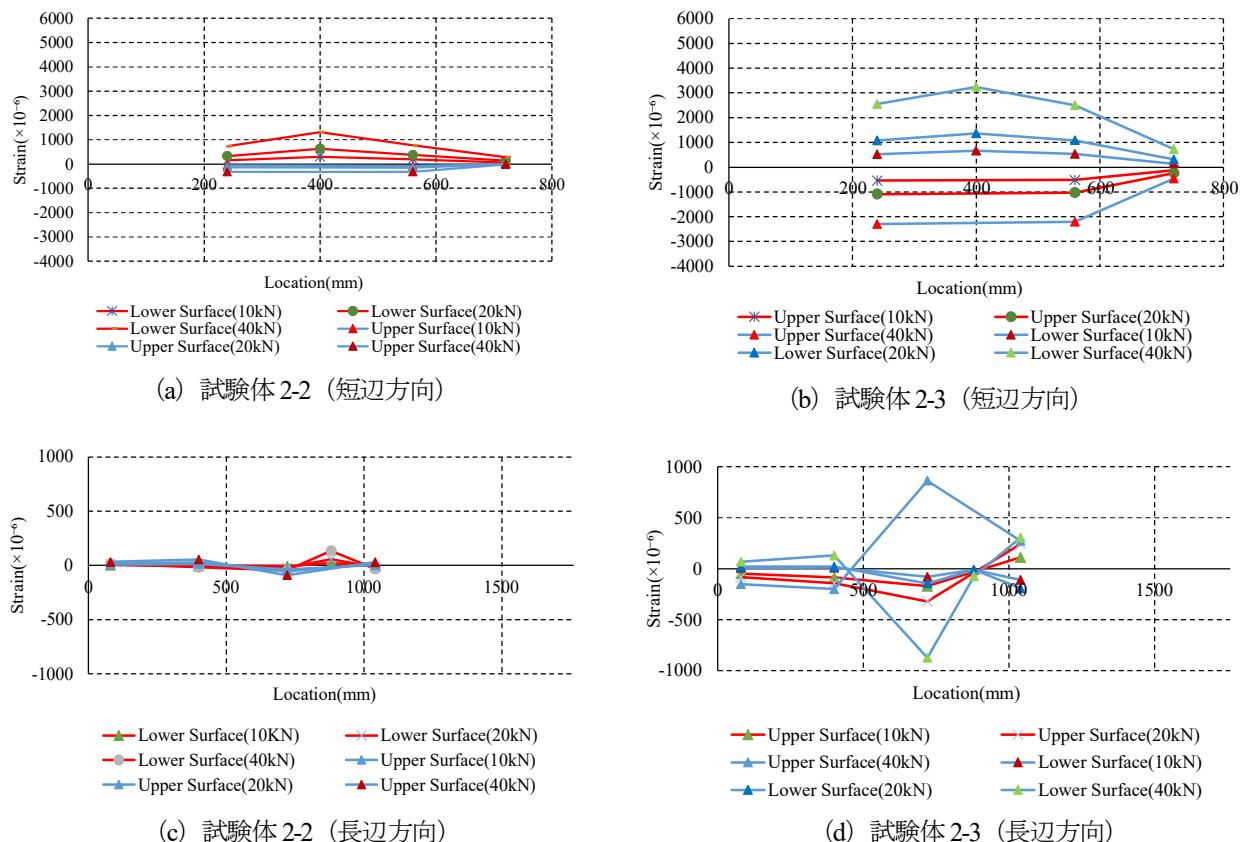


図-15 試験体 2 ひずみ分布図

4.3 ひずみ発生状況

試験体 1 のひずみ分布図を図-14 に示す。試験体 1-1 は載荷中、早期にコンクリート版同士の接着接合が破壊され、合成構造として機能していないことから、比較的信頼性の高い試験体 1-2 のひずみ分布図を示している。図-14 (a), (b) より試験体 1 は短辺方向において一様に曲げを受けていることが分かる。また、試験体 1-2 は試験体 1-3 と比較すると、上面と下面のひずみが小さいことが分かる。これより GFRP グレーチング上部にコンクリート層を配置することで、ひずみの発生を抑制する効果が確認された。

試験体 1-2 の長辺方向のひずみについて、図-14 (c) より試験体端部から 750mm の位置まで、試験体上面では引張によるひずみ、下面では圧縮によるひずみが発生し短辺方向と比較するとひずみの正負が逆転していることがわかる。これはコンクリート版間の接着接合が部分的に破壊したことによりコンクリート層が一体として機能できていないことが推測される。また図-14 (d) より試験体 1-3 についてもひずみの正負の逆転が確認できる。これは、載荷時に試験体の四隅を万力で固定したこと、GFRP グレーチングの剛性が小さいことから、載荷時に試験体が過大に変形したことにより形状の凹凸が逆転したことが原因であると考える。

図-15 に試験体 2 のひずみ分布図を示す。試験体 2-2 は試験体 2-1 と比較すると長期にわたり合成構造を維持できていた可能性があるため、試験体 2-2 のひずみ分布図を代表例として示している。図-15 (a), (b) より短辺方向についてひずみの分布図から曲げを受けていることがわかる。試験体 2-2 は下面のひずみに対して上面のひずみが小さいことから、コンクリート層と GFRP 床材が一体として挙動できていないことが推測される。また、試験体 2-2 は試験体 2-3 と比較してひずみが小さいことから、コンクリート層によるひずみの抑制が確認できた。図-15 (c) より試験体 2-2 において長辺方向ではひずみがほとんど発生していないことがわかる。これより試験体 2 は GFRP 部の構造の特徴として短辺方向にのみパイプを配置したため、長辺方向への応力の伝達ができていない可能性が示唆された。図-15 (d) より、試験体 2-3 においても長辺方向のひずみはほとんど確認できないことから、長辺方向への荷重の伝達が難しいことがわかる。また、40kN 載荷時に比較的大きなひずみが発生していることがわかる。これは GFRP 形材同士の接合部において部分的に破壊が起きていることが原因と考える。

5. まとめ

本研究では、GFRP 製床版の上面にコンクリートを設置し合成構造を持たせた床版モデルに対して、押し抜きせん断試験を実施した。本研究で得られた知見を以下に示す。

(1)コンクリートと GFRP グレーチングを組み合わせた合成構造は早期にコンクリートと GFRP 間の接合が破壊され、合成構造としての耐荷機構を喪失する傾向にあることが確認された。

(2)コンクリートと GFRP 形材を組み合わせた合成構造では、コンクリートと上部 GFRP 積層板の接合が比較的維持される傾向にあることが示された。

(3)コンクリートと GFRP 形材を組み合わせた合成構造では長辺方向の荷重分配性能が問題となる可能性が確認できたことから、荷重分配性能を向上させるために GFRP 部内の接合部の強化が必要である。

謝辞

本研究を実施するにあたり（一社）東北地域づくり協会 R5 年度建設事業に関する技術開発支援事業による助成を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1)国土交通省：道路メンテナンス年報 2023, pp.59-60, 2023.
- 2)公益社団法人 日本コンクリート工学会：コンクリート工学, 52巻, 1号, pp.108-114, 2014.
- 3)大西弘志, 西田雅之, 清水則喜, 八重樫功隱：格子構造を有する FRP 床版の静的曲げ試験, 第 10 回複合構造・合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.62-1-62-6, 2013.
- 4)大西弘志, 山本竜一, 西田雅之：格子構造を有する FRP 床版の静的載荷試験, 第 5 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演論文集, pp.178-185, 2014.
- 5)盛合将和, 大西弘志, 高橋浩介, 中原楓：接着接合により断面構成された GFRP 板材の断面寸法の影響, 第 13 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集, pp.224-231, 2019.
- 6)日本道路協会：道路橋示方書・同解説書 II 鋼橋・鋼部材編, p.41, 2017.
- 7)土木学会：構造工学シリーズ 14 FRP 橋梁-技術とその展望, pp.18-24, 2004.

(2024 年 7 月 12 日)